

随机纤维过滤器捕捉气溶胶颗粒特性研究

许 诺, 吴世青, 向文婷

上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093

摘 要:目的 气溶胶作为 COVID-19 (Coronavirus Disease 2019) 的主要载体, 使用随机纤维过滤器可以有效阻隔病毒传播。但非织造随机纤维过滤器由于结构复杂, 难以建立符合真实情况的三维模型, 从而无法对其进行模拟分析来指导过滤器设计与生产。**方法** 基于随机算法建立不同参数的纤维过滤器三维模型, 对比传统规则模型, 采用多种经验计算式验证该方法的优势和有效性, 分析随机纤维过滤器在特定工况下对气溶胶颗粒物的过滤性能, 使用欧拉-拉格朗日离散相模型对随机纤维过滤器的压力损失和气溶胶颗粒捕集效率进行模拟计算。**结果** 仿真试验结果表明: 流体速度为 0.04 m/s 和 0.112 m/s 的纤维过滤器对所选气溶胶颗粒物具有较为稳定的过滤效率, 处于 84.43%~95.28% 之间; 流场压力损失呈分层现象, 在较慢的流体速度下可以获得更为良好的过滤性能。**结论** 该方法所建随机排列的纤维集合体模型对比传统方法更接近真实的纤维材料, 为理解和改进过滤技术提供数据与结论, 有助于设计更好的防护措施, 阻碍病毒传播。

关键词: 气溶胶; 空气过滤; 随机建模; 数值模拟

中图分类号: TU834.83 文献标识码: A doi: 10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0005.008

Characterization of Aerosol Particles Captured by Random Fiber Filters

XU Nuo, WU Shiqing, XIANG Wenting

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Objective Aerosols act as the main carrier of COVID-19 (Coronavirus Disease 2019), and the use of random fiber filters can effectively block virus transmission. However, due to the complex structure of non-woven random fiber filters, it is difficult to establish a three-dimensional model that conforms to the real situation. As a result, it is impossible to conduct simulation analysis on them to guide the design and production of the filters. **Methods** A three-dimensional model of fiber filters with different parameters was established based on random algorithms. Comparative analysis with traditional rule-based models was conducted using various empirical formulas to validate the advantages and effectiveness of this method. The filtration performance of random fiber filters on aerosol particles under specific conditions was analyzed, and simulation calculations of pressure loss and aerosol particle capture efficiency were performed using the Euler-Lagrange discrete phase model. **Results** Simulation experiments showed that fiber filters at fluid velocities of 0.04 m/s and 0.112 m/s exhibited stable filtration efficiency for selected aerosol particles, ranging from 84.43% to 95.28%. Pressure loss in the flow field exhibited a stratified phenomenon, with better filtration performance achieved at slower fluid velocities. **Conclusion** The randomly arranged fiber aggregate model constructed by this method is closer to real fiber

收稿日期: 2022-12-28 修回日期: 2023-04-20 文章编号: 1672-058X(2025)05-0063-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005338)资助。

作者简介: 许诺(1998—), 男, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 从事空气过滤材料研究。

通信作者: 吴世青(1987—), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士, 从事智能化与数字化研究。Email: wsqusst@126.com.

引用格式: 许诺, 吴世青, 向文婷. 随机纤维过滤器捕捉气溶胶颗粒特性研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(5): 63-71.

XU Nuo, WU Shiqing, XIANG Wenting. Characterization of aerosol particles captured by random fiber filters[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(5): 63-71.

materials compared with traditional methods. It provides data and conclusions for understanding and improving filtration technology, facilitating the design of better protective measures to prevent virus transmission.

Keywords: aerosol; air filtration; random modeling; numerical simulation

1 引言

在抗击新型冠状病毒(COVID-19)的战斗中,气溶胶被确认为主要的传播途径之一^[1],COVID-19 可通过患者的呼吸、咳嗽和喷嚏产生的气溶胶颗粒在空气中传播^[2],并悬浮在空气中存活数小时,造成感染风险^[3]。使用非织造材料纤维膜制成的过滤器可以帮助人们有效遏制这一传播途径^[4]。

为了研究过滤器性能,一种有效的方法是使用计算机技术构建纤维集合体三维模型,结合流体力学进行数值模拟。这一方法足够以直观且高效的形式揭示非织造随机纤维过滤器对气溶胶颗粒物的过滤效果,从而讨论其性能特征。Wang 等^[5]开发了一个三维虚拟模型,用于在不允许穿透的情况下将直纤维集合水平放置,基于该模型,可以进行数值模拟和计算,分析不允许穿透的纤维集合体的力学、热学、电磁等性能,为新材料的研发和应用提供理论依据;Saleh 等^[6]开发了一种构建随机纤维过滤膜三维模型的方法,该方法首先随机生成二维平面内纤维形状,后以堆叠的形式生成三维模型,将三维问题分解为二维问题处理,降低了模型构建的复杂性,使得计算和模拟过程更加高效和可行;景慧^[7]利用 Micro-CT 对随即纤维集合体进行断层扫描,使用三维可视化技术提取纤维集合体的微观结构,从而建立纤维集合体的真实结构,该方法与传统方法相比,可以获得高分辨率的成像且不会破坏样品;Puszkars 等^[8]利用 Python 脚本和 C++编程,使用 Kelvin-Voight 方法复制电纺纤维材料,将纤维表示为一系列弹簧和阻尼器,使用编程语言实现模型,便于数据分析和可视化,且具备灵活性和可扩展性。以上学者的工作旨在运用计算机技术构建集合体模型以揭示其内在机理与性能表现,力求最大程度还原实际过滤材料的微观结构特征,但针对模型应用于特定场景的研究仍有所欠缺。

综合以上研究,本文采用随机算法建立接近真实的非织造纤维过滤材料微观结构的三维模型,这种模型可以生成多种纤维分布情况,提高模拟的精度和可靠性。为使得计算可行,选取微小尺寸模型来映射完整的纤维材料,使用多种经典经验模型验证,对规则和随机排列的纤维过滤器内部气相流场进行数值模拟,通过 DPM (Discrete Phase Model) 跟踪气溶胶粒子轨

迹,模拟实际工况下的气溶胶颗粒路径,结合纤维过滤器过滤效率与 FOM (Figure of Merit) 值来分析其过滤特性,为理解和改进过滤技术提供数据与结论,有助于设计更好的防护设备,减少气溶胶颗粒的传播。

2 方法

模拟仿真作为研究纤维材料空气过滤的常用手段,只有当模拟现象与原型相似时才能使模拟结果有意义^[9]。

原型与模型的相似需包括 3 个方面:几何相似、运动相似和动力相似。相似准则和相似指标反映相似两现象中各个物理量相互制约的关系。工况的设计基于流体动力学中的相似准则^[10],相似的两个流动,其控制流动的微分方程和求解的单值条件相似。本文在进行相似模拟试验前确立相似指标和相似准则,基于随机算法建立试验模型,从而使试验结果能在一定程度上反映原型。

2.1 模型建立

在研究内部结构具备随机性的纤维膜流动现象前,需依照原型材料建立形貌相似的足尺模型。非织造纤维材料 PVDF 质量分数为 19% 的表面形貌如图 1 所示,可以看出真实过滤材料表面的纳米 PVDF 纤维膜内部错综复杂,大量纤维粘连,导致表面孔隙较为密实,单根纤维并非连续和均匀,而是存在大量的颗粒状串珠结构或锥柱体结构,末端及中间部分存在断裂和尖点。材料的粗细不均和形态多样性也导致局部应力集中,进而产生断裂和损伤。因此面对如此复杂的过滤材料,建立起真实形态的三维模型难度较大。

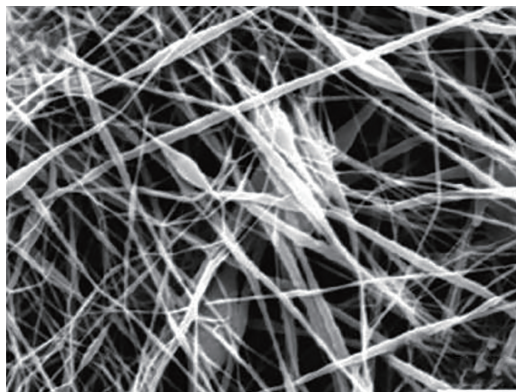


图 1 PVDF 材料的表面形貌

Fig. 1 Surface morphology of PVDF materials

为此,基于随机算法建立接近实际情况的过滤器三维模型,将单根纤维近似为圆柱体,从而使得后续试验具备可行性。建模步骤如图 2 所示。生成圆柱体之前需要设置其边界条件,包括 X (Range of x -coordinates)、 Y (Range of x -coordinates)、 Z (Range of x -coordinates)、 R (Radius)、 L (Length) 和 C (Count)。其中 X 、 Y 、 Z 规定了后续坐标点的生成范围,即在什么位置生成圆柱体; R 规定了圆柱体的半径范围; L 规定了圆柱体的长度范围; C 规定生成多少根圆柱体。3 个随机坐标点中,前两点作为起点和终点来决定圆柱体的位置和长度,第 3 点与终点之间的距离为圆柱体的半径。内循环用于确保单根符合条件圆柱体的生成,主循环则确保生成足够数量的圆柱体。使用这种方法可以完全自由地控制任意圆柱的位置、长度和半径在规定的范围内。所建随机纤维体的直径服从正态分布,圆柱的长度和位置在一定范围内随机分布。

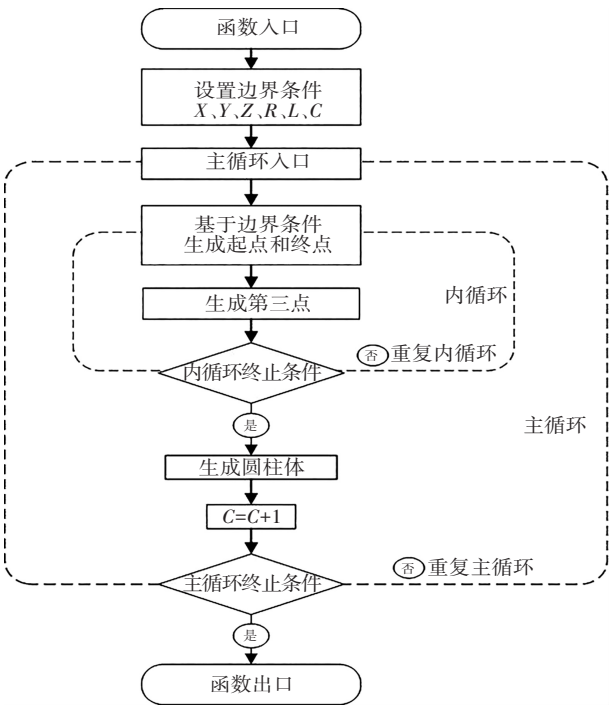


图 2 随机算法流程图

Fig. 2 Stochastic algorithm flowchart

一些学者提出使用具有简单几何结构的数学模型来表征实际的纤维过滤器结构^[11]。如图 3 所示为传统规则排列纤维过滤器模型和随机纤维过滤器模型。前者纤维沿着一个或多个特定的方向进行有序排列,纤维通常形成明确的纹理和方向,由于排列有序,纤维之间的接触通常是平行或按照一定角度交叉,导致孔隙形态和尺寸相对一致,重复性更强。规则排列在建模方面表现出色,计算较为简单,但往往与真实 PVDF 纤维结构相差较大。而随机排列的纤维集合体可以以任意角度互相交错,模拟和建模复杂度高,但结构更接近

真实纤维聚集情况。

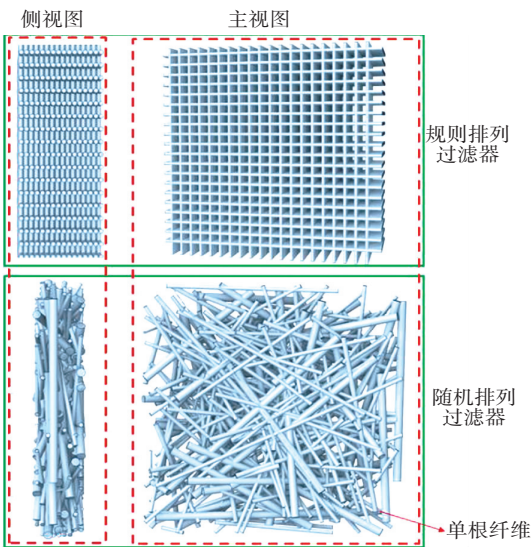


图 3 规则排列和随机排列的纤维集合体

Fig. 3 Regularly arranged and randomly arranged fibre aggregates

为进一步比较上述两种建模方法的可靠性,构建两组不同结构的纤维过滤器三维模型,如表 1 所示,用于后续的分析讨论。

表 1 模型参数			
Table 1 Model parameters			
编 号	纤维平均直径 d_f/nm	规则组固体率 $\alpha_r/\%$	随机组固体率 $\alpha_r/\%$
1	45	1.41	7.39
2	80	12.51	10.71
3	100	19.58	10.33
4	120	28.25	10.65
5	140	38.41	17.21
6	150	44.16	22.39

2.2 边界条件与控制方程

图 4 给出边界条件的设置。模型的边界条件采用 Velocity-inlet、Pressure-outlet, 出口表压为 0, 计算域(纤维集合体)四周设为 Wall, 流体不可直接穿过纤维介质, 纤维集合体属性设置为 trap 类型。

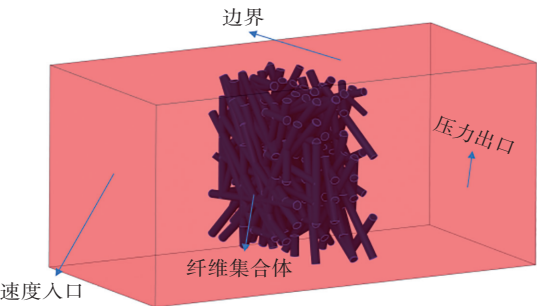


图 4 边界条件

Fig. 4 Boundary condition

微分方程和定解条件作为 CFD 流体模拟的基础, 决定模拟是否具备实际意义。作为连续相流体, 运动过程中的质量不会改变, 任意的流场条件都需满足质量守恒方程, 其表达式(1):

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (1)$$

动量方程见式(2):

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{v_x \partial v_x}{\partial x} + \frac{v_y \partial v_x}{\partial y} + \frac{v_z \partial v_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{v_x \partial v_y}{\partial x} + \frac{v_y \partial v_y}{\partial y} + \frac{v_z \partial v_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{v_x \partial v_z}{\partial x} + \frac{v_y \partial v_z}{\partial y} + \frac{v_z \partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

其中, v 为流速, 单位为 m/s ; v_x, v_y, v_z 分别为 x, y, z 方向上的速度; t 为时间, 单位为 s ; ρ 为流体密度, 单位为 kg/m^3 ; p 为压力, 单位为 Pa ; μ 为流体动力粘度, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。将上述物理量作为单值性条件与相似物理量 v', ρ', t', p', μ' 相比, 分别为 C_v, C_ρ, C_t, C_p 和 C_μ , 比值均为常数。流动的相似准则为雷诺数 Re 和欧拉数 E_u , 相似指标为 $\frac{C_\mu}{C_t C_v C_\rho}$ 和 $\frac{C_p}{C_v^2 C_\rho}$, 值都为 1。

为了探究随机纤维过滤膜纤维直径与固体率对压力损失的影响, 其他相关工况均设定为统一值。足尺模型采用几何相似倍数 $C_l = 1\ 000$, 除三维模型相似外, 流体的流动也相似, 工况参数取常温常压下的空气参数。

2.3 经验模型

在评判过滤介质的整体性能时, 压力损失是重要的指标之一。许多学者致力于通过分析、数值和实验证明的方法创建接近现实的模型, 得出不同的理论和经验表达式。作为被广泛应用的定律, Darcy 定律可以用于描述多孔介质中流体流动时的压力损失, 因为其考虑流体在通过孔隙结构时所面临的阻力效应, 只需通过此类多孔介质的渗透率及流体的流动条件, 就可以使用 Darcy 定律预测并计算出流体在多孔介质时的压力损失。本文所选随机纤维材料 PVDF, 依据此材料所构模型符合多孔介质特性, 因此可以使用 Darcy 定律计算通过纤维集合体时的压力损失。

$$\Delta P = \frac{\mu v W}{d_f^2} f(\alpha_f) \quad (3)$$

其中, $f(\alpha_f)$ 为固体度的无量纲函数, α_f 为固体率, μ 为流体动力粘度, v 为流体速度, W 为纤维过滤膜厚度。

关于无量纲阻力 $f(\alpha_f)$, 有如下几种表达式, 其中 Davies 表达式(式(4))应用最为广泛:

$$f(\alpha_f) = 64\alpha_f^{1.5} (1 + 56\alpha_f^3) \quad (4)$$

较为早期的经典模型有 Happel^[12] 的无量纲函数,

表达式为

$$f(\alpha_f) = - \frac{32\alpha_f}{\left[\ln(\alpha_f) + \frac{(1+\alpha_f)^2}{(1+\alpha_f)^2} \right]} \quad (5)$$

Hosseini 和 Rao 等^[13-14] 给出的无量纲函数表达式为式(6)和式(7):

$$f(\alpha_f) = 2.446\alpha_f + 38.16\alpha_f^2 + 138.9\alpha_f^3 \quad (6)$$

$$f(\alpha_f) = 2.653\alpha_f + 39.34\alpha_f^2 + 144.5\alpha_f^3 \quad (7)$$

本文借助计算机软件以数值模拟的方法得到了气相流场的模拟结构, 并与上述经验式对比, 从而验证模拟的有效性。

3 仿真实验与结果分析

三维模型下的过滤机制主要依靠过滤不同大小气溶胶颗粒物所形成的惯性效应、筛滤效应、拦截效应、扩散效应和静电效应。5 种效应相互叠加形成对纤维类空气过滤器过滤气溶胶颗粒物的“协调效应”^[15]。

空气过滤介质的分析和经验模型是预测过滤效率和压力损失的重要工具^[16-17]。评判纤维类空气过滤器过滤性能的指标主要有过滤效率 E_F 、过滤时的压力损失 ΔP 和 FOM 值。其中过滤效率是指材料对气溶胶颗粒物的截留效率, 目前纤维空气过滤器的理论过滤效率研究主要采用计数过滤效率, 其计算公式见式(9):

$$E_F = (1-p) \times 100\% \quad (8)$$

$$p = \frac{Q_1}{Q_0} \quad (9)$$

其中, E_F 为过滤效率, p 为穿透率, Q_0 为入射颗粒物总数, Q_1 为未过滤器捕获的颗粒物数量。

压力损失测得材料上下游风口间的压力差, 单位常用 Pa 表示, 计算公式见式(10):

$$\Delta P = P_0 - P_1 \quad (10)$$

其中, ΔP 为压力损失, P_0 为气流流入面的压力, P_1 为气流流出面的压力。

FOM 值是每单位厚度的过滤效率除以每单位厚度压降的比值, 计算方法为渗透自然对数除以过滤器压力变化的负值^[18]。通过分析压力分布, 可以降低压力损失, 对提高使用体验等方面具有重要意义, 其计算公式见式(11):

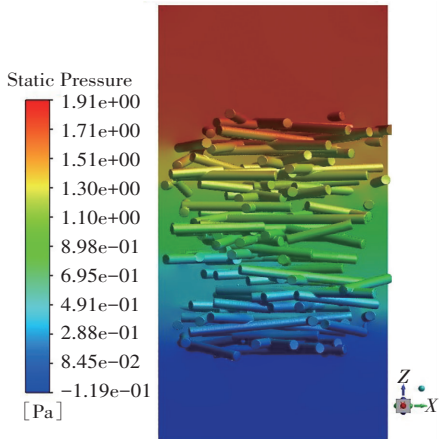
$$F_{\text{FOM}} = \frac{-\ln(1-E_F)}{\Delta P} \quad (11)$$

其中, E_F 为过滤效率, ΔP 为压力损失。

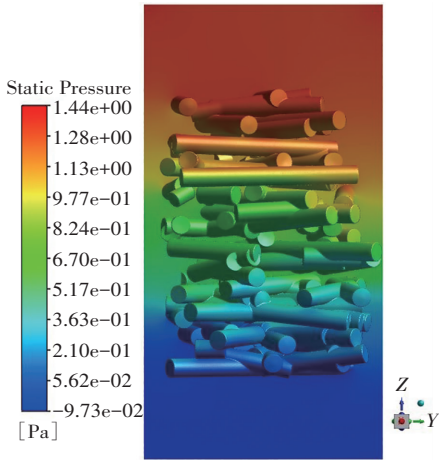
3.1 对比验证

图 5 为不同直径的随机纤维集合体在相同工况下的流场压力分布情况。流体在垂直于入口法线方向上压力无明显变化, 在入口法线流动方向上流场压力存在显著分级现象, 这是由于流体通过纤维集合体, 由于内部微小涡旋、湍流和壁面剪切应力的作用, 在纤维集

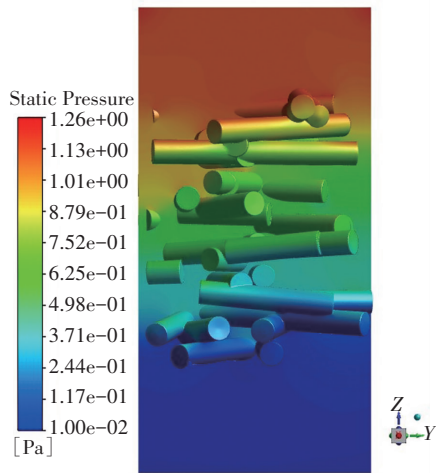
合体之间发生能量损耗,导致沿流动方向的压力逐步下降。随机纤维集合体可视为多孔介质,Darcy 定律的理论同样适用,其中压力损失随流动路径的增长而逐渐累积,也会表现为压力分布的分级。流体通过纤维集合体前压力处于最大值,进入后变化较为剧烈。纤维直径越大,迎风面的红色区域和背风面的蓝色区域越呈现出扩大趋势,说明对流场的干扰更加明显。



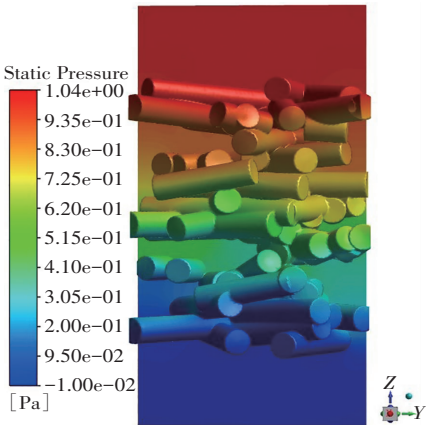
(a) $d_f = 45 \mu\text{m}$



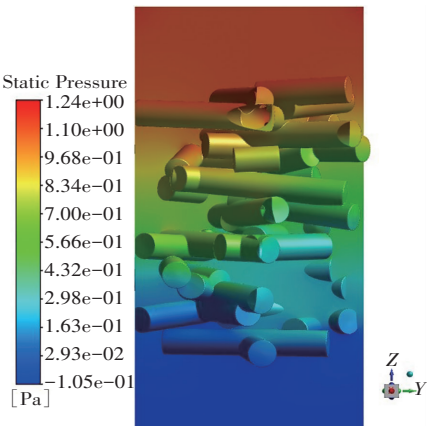
(b) $d_f = 80 \mu\text{m}$



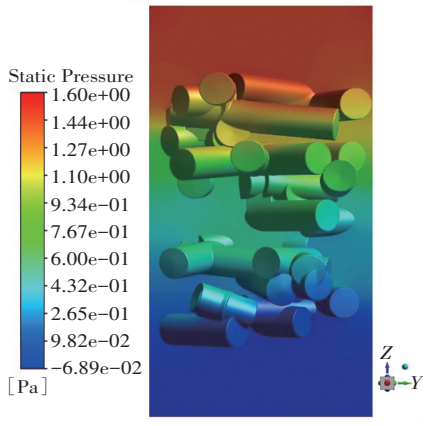
(c) $d_f = 100 \mu\text{m}$



(d) $d_f = 120 \mu\text{m}$



(e) $d_f = 140 \mu\text{m}$



(f) $d_f = 150 \mu\text{m}$

图 5 不同直径随机纤维过滤集合体模型流场压力分布
Fig. 5 Pressure distribution in the flow field of a random fibre filtration aggregate mode with different diameters

图 6 为不同直径的规则纤维集合体在相同工况下的流场压力分布情况。不同于随机排列形成的压力损失分布的局部性,规则排列的压力几乎沿竖直方向递减,同一水平位置的压强基本一致。不同直径的规则纤维集合体在迎风面的红色区域与背风面的蓝色区域大小基本相同,过于均匀则无法体现真实纤维过滤膜中复杂的压力分布情况。

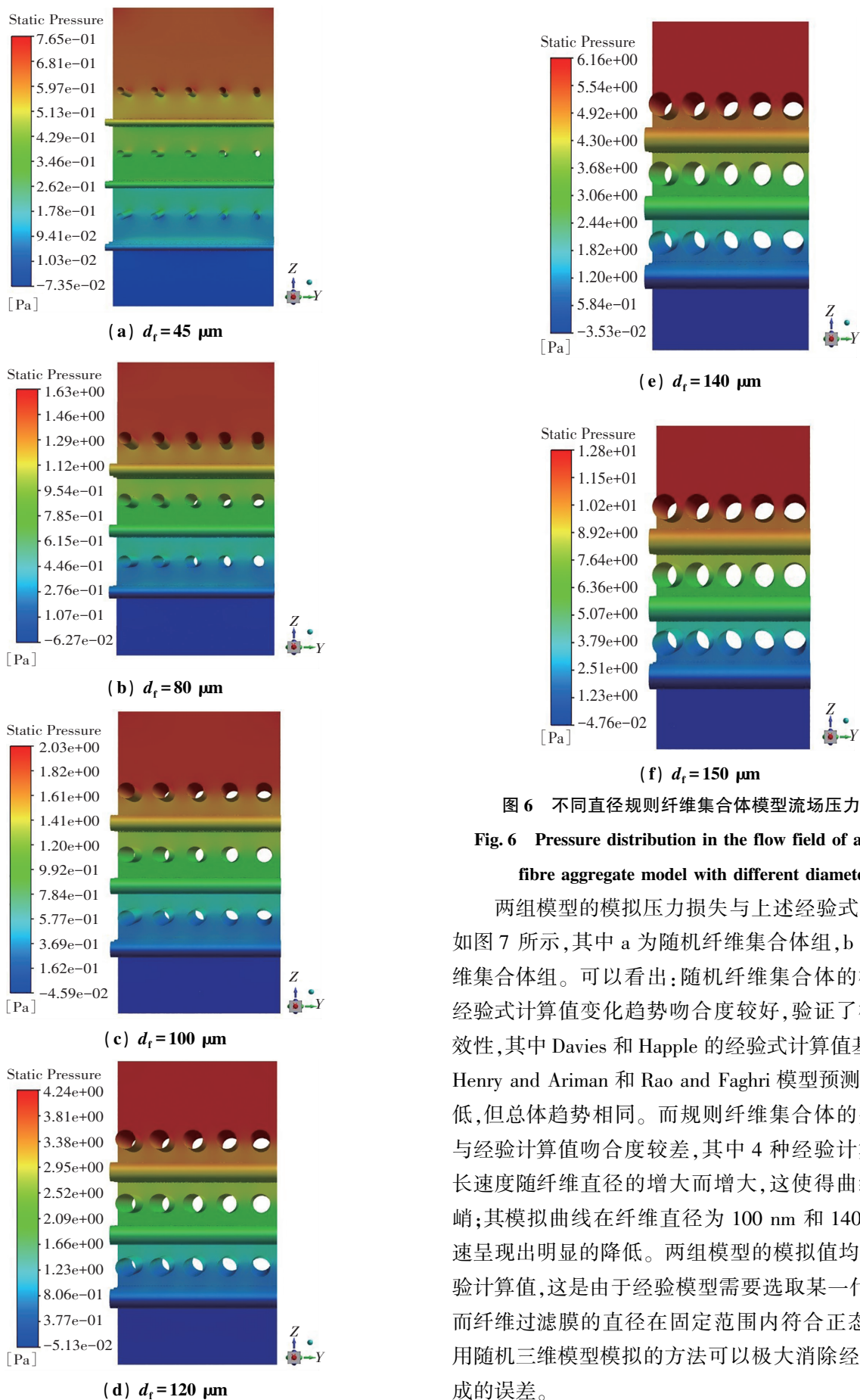
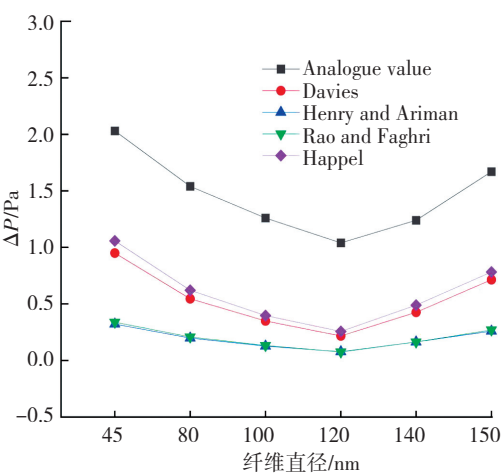


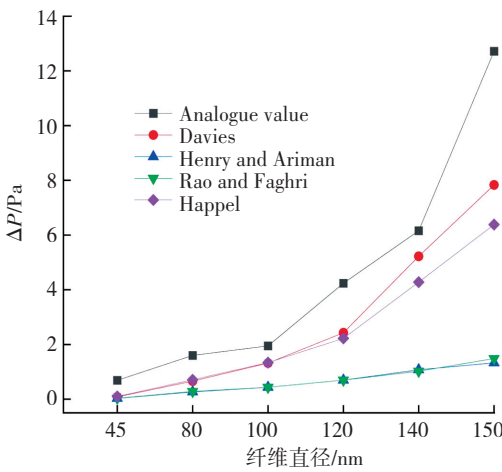
图 6 不同直径规则纤维集合体模型流场压力分布

Fig. 6 Pressure distribution in the flow field of a regular fibre aggregate model with different diameters

两组模型的模拟压力损失与上述经验式对比结果如图 7 所示,其中 a 为随机纤维集合体组, b 为规则纤维集合体组。可以看出:随机纤维集合体的模拟值与经验式计算值变化趋势吻合度较好,验证了模型的有效性,其中 Davies 和 Happle 的经验式计算值基本重合, Henry and Ariman 和 Rao and Faghri 模型预测值明显偏低,但总体趋势相同。而规则纤维集合体的变化趋势与经验计算值吻合度较差,其中 4 种经验计算值的增长速度随纤维直径的增大而增大,这使得曲线愈发陡峭;其模拟曲线在纤维直径为 100 nm 和 140 nm 处增速呈现出明显的降低。两组模型的模拟值均略大于经验计算值,这是由于经验模型需要选取某一代表直径,而纤维过滤膜的直径在固定范围内符合正态分布,使用随机三维模型模拟的方法可以极大消除经验模型造成的误差。



(a) 随机排列纤维集合体



(b) 规则排列纤维集合体

图 7 规则排列和随机排列纤维集合体压力损失与经验值对比
Fig. 7 Comparison of pressure losses of regularly arranged and randomly arranged fibre aggregates with empirical values

3.2 过滤效率

图 8 为一款防护头罩,内置过滤通风系统,可实现全自动过滤空气中的气溶胶颗粒,将干净的空气送入头罩内部。红色部分为头罩的过滤器,由外壳与纤维过滤膜构成,其中纤维过滤膜由 4 979 根圆柱体构成,固体体积分数为 22.25%,纤维直径范围 40~120 nm,遵循正态分布。由于此类模型纤维数量过多,在微米尺度下,划分出的网格极小,为了模拟的可行性,选取 $1\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m} \times 0.6\text{ }\mu\text{m}$ 的小块区域并等比放大,将整张纤维膜看作均匀分布,将每一部分的数值模拟结果映射至整张纤维膜。

本文运用拉格朗日离散相模型,对纤维过滤器内部气溶胶颗粒的运动路径进行追踪,统计出入口的气溶胶颗粒数目即可使得研究内容更加可视化。该模型以粒子为中心,适用于多种颗粒尺寸分布和形状,能够

直观处理复杂的边界条件,例如本文中颗粒与固体纤维集合体的相互作用。图 9 能够清晰示出气溶胶颗粒在过滤过程中的行进轨迹,可以观察到部分颗粒与纤维集合体接触后运动路径消失的现象,这是由于这些颗粒碰撞至纤维表面被有效捕获。同时,亦存在一些成功绕过纤维集合体进行流动的粒子,它们最终会在出口位置被纳入统计范畴。

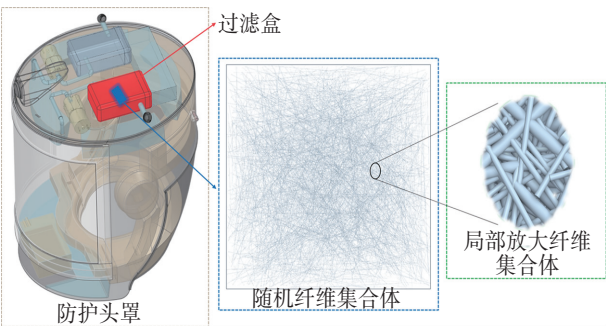


图 8 从防护头罩中抽取随机纤维集合体模型

Fig. 8 Modelling random fibre ensembles from protective hoods

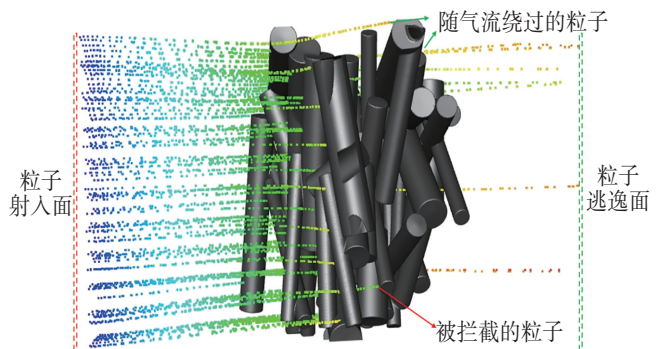


图 9 气溶胶颗粒流动轨迹图

Fig. 9 Flow trajectories of aerosol particles

不同入口速度条件下纤维过滤膜对不同粒径的气溶胶颗粒物的过滤效率如图 10 所示。不同入口流速工况下,随机纤维过滤模型对不同粒径的气溶胶颗粒物捕捉效率维持在 84.43%~95.28%之间。本文采用拉格朗日离散相,对纤维过滤器模型捕获气溶胶颗粒的效率进行了测试,因此气溶胶颗粒与气溶胶颗粒之间的碰撞与作用力被忽略。入口速度为 0.47 m/s、0.96 m/s 和 1.5 m/s 的工况随着气溶胶颗粒直径的增大表现出明显的过滤效率降低现象,过滤效率在单一速度下会随着颗粒物直径增大而呈现减小趋势;入口速度为 0.04 m/s 和 0.112 m/s 的纤维过滤膜对所选的气溶胶颗粒物具有较为稳定的过滤效率。由于纤维过滤膜是随机生成,并非均匀分布,部分分布紧密的区域

可以有效拦截气溶胶颗粒,部分粒子随流体绕过较为稀疏的纤维从而逃逸,由此损失了部分过滤效率。

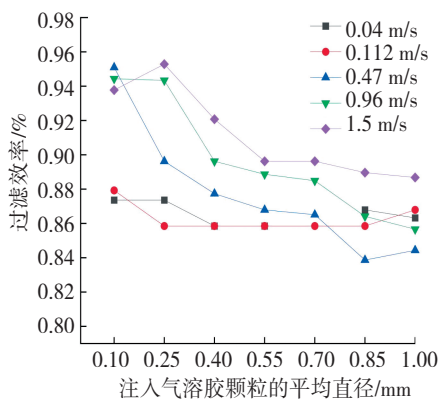


图 10 不同速度下随机纤维集合体对不同粒径气溶胶颗粒的过滤效率

Fig. 10 Filtration efficiency of random fibre aggregates at different velocities for aerosol particles of different sizes

3.3 FOM 值

不同速度下纤维过滤膜对不同粒径气溶胶颗粒的 FOM 值如图 11 所示。从图 11 可知:单一速度下的纤维膜对不同粒径的气溶胶颗粒 FOM 曲线基本一致,并无明显波动。说明气溶胶颗粒对 FOM 值影响较小,而随着速度的变化,曲线呈现出分级现象,并且随着速度越来越大,等级间的差距越来越小,速度为 0.96 m/s 和 1.5 m/s 的工况下,FOM 差值维持在 0.054 5 左右,且曲线波动基本一致。因此在较慢的流体速度下可以获得更为良好的材料过滤性能。

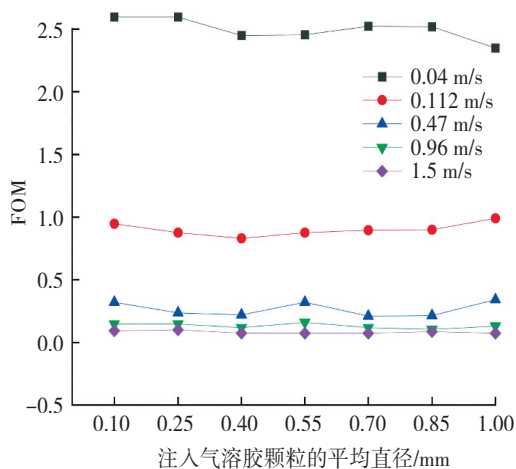


图 11 不同速度下随机纤维集合体对不同粒径气溶胶颗粒的 FOM 值

Fig. 11 FOM values of aerosol particles of different sizes by random fibre aggregates at different velocities

3.4 结果分析

本文使用随机算法建立随机排列的纤维集合体微观结构模型,利用经典经验计算式验证建模方法的可靠性,在此基础上对纤维过滤膜进行气固两相流动数值模拟。以下为分析结果:使用上述建模方法建立的相似模型是合理的,随机分布的纤维集合体压力损失值相比传统规则分布更接近于经验计算值,且曲线整体变化趋势基本一致,为研究亚微米纤维及其气固流动提供了可靠性;流场的压力分布存在分级现象,纤维集合体作为划分层级的媒介,气流在入口处压力最大,通过纤维过滤膜时流场变化最为剧烈,在出口处压力接近于 0,规则分布纤维集合体的压力层分布过于连续和均匀;随机纤维过滤膜对气溶胶颗粒过滤效率维持在 84.43%~95.28%之间,入口速度为 0.47 m/s、0.96 m/s 和 1.5 m/s 的工况随着气溶胶颗粒直径的增大表现出明显的过滤效率降低现象,入口速度为 0.04 m/s 和 0.112 m/s 的纤维集合体对所选气溶胶颗粒物具有较为稳定的过滤效率;较慢的流体速度下,过滤器对气溶胶颗粒的过滤性能更好,随着速度的变化,FOM 曲线呈现出分级现象,随着速度越来越大,等级间的差距越来越小。

4 结论与展望

在传统的纤维集合体建模方法中,只能通过固定方式的排列生成一定规则的模型,用于研究非织造型随机纤维集合体时,往往无法接近真实形貌特征。为了更好地对随机纤维过滤器进行空气过滤数值分析,本文在传统方法的基础上引入随机算法,以得到更接近真实的三维模型,此模型在形貌特征与试验结果中较传统方法表现更优。

本文聚焦于过滤器性能的局部模拟与优化,采用模型的特定区域作为基础,这一策略是鉴于当前计算机硬件资源的局限性,无法承载构建并实时仿真整个大型过滤器系统全尺寸、高精度的三维足尺模型。通过这种有针对性地选择和简化,本文在有限计算能力下有效探索了随机纤维过滤器的工作原理及其关键结构对性能的影响。

随着模型轻量化技术的持续发展和计算机科学的进步,有望克服现有挑战,实现复杂过滤器结构及其孪生模型。通过对三维模型进行高效的数据压缩、特征提取以及智能简化等轻量化处理手段,可以期待在未来的研究

中实现更庞大、更精细的过滤器模型在不同工作条件下的动态仿真,从而提高预测精度与设计效率。

此外,在此研究阶段,尚未将静电场效应纳入分析范畴,这是另一个值得深入探讨的方向。静电场在许多过滤器的实际使用场景中扮演着至关重要的角色,它可能显著影响颗粒物的捕集效率和流动特性。因此,在后续数值模拟工作中,集成静电场作用机制将是提升模拟真实性和优化过滤器设计的重要步骤,有助于开发出适应更广泛工况,且性能优越的新型过滤设备。

参考文献(References):

- [1] WANG C C, PRATHER K A, SZNITMAN J, et al. Airborne transmission of respiratory viruses [J]. *Science*, 2021, 373 (6558): 981–994.
- [2] 韩梦, 李颖, 曹晓梅. 新型冠状病毒气溶胶的采集和检测技术研究进展[J]. *质量与安全检验检测*, 2023, 33(3): 72–79.
- HAN Meng, LI Ying, CAO Xiao-mei. Research progress on the collection and detection techniques for SARS-Cov-2 aerosol[J]. *Quality Safety Inspection and Testing*, 2023, 33(3): 72–79.
- [3] DOREMALEN N V, BUSHMAKER T, MORRIS D H, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1[J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382(16): 1564–1567.
- [4] LIU W, YUE X G, TCHOUNWOU P B. Response to the COVID-19 epidemic: The Chinese experience and implications for other countries[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7): 2304–2310.
- [5] WANG Q, MAZE B, TAFRESHI H V, et al. A case study of simulating submicron aerosol filtration via lightweight spun-bonded filter media[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(15): 4871–4883.
- [6] SALEH A M, HOSSEINI S A, VAHEDI TAFRESHI H, et al. 3-D microscale simulation of dust-loading in thin flat-sheet filters: A comparison with 1-D macroscale simulations[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 99(9): 284–291.
- [7] 景慧. 散纤维集合体的微观结构特征及压缩力学行为表征[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- JING Hui. Characterization for micro-structure and compressional behaviour of general fibrous assemblies [D]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [8] PUSZKARZ A K, MACHNOWSKI W, BIASIŃSKA A. Modeling of thermal performance of multilayer protective clothing exposed to radiant heat[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2020, 56(6): 1767–1775.
- [9] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005: 9–35.
- YANG Jun-jie. Similarity theory and structural model test[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005: 9–35.
- [10] SUN Y, ZHANG Z, SUN Y. Calculation method and application of time-varying transmission rate via data-driven approach[J]. *Mathematics*, 2023, 11(13): 2955–2968.
- [11] WANG C, OTANI Y. Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: A review [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(1): 5–17.
- [12] MANSOURIZADEH A, ISMAIL A F. Hollow fiber gas-liquid membrane contactors for acid gas capture: A review [J]. *Journal of hazardous materials*, 2009, 171(1–3): 38–53.
- [13] HOSSEINI S A, TAFRESHI H V. 3-D simulation of particle filtration in electrospun nanofibrous filters [J]. *Powder Technology*, 2010, 201(2): 153–160.
- [14] RAO N, FAGHRI M. Computer modeling of aerosol filtration by fibrous filters[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1988, 8(2): 133–156.
- [15] HOSSEINI S A, TAFRESHI H V. 3-D simulation of particle filtration in electrospun nanofibrous filters [J]. *Powder Technology*, 2010, 201(2): 153–160.
- [16] DZIUBAK T. Material properties analysis with addition of nanofibres for air intake filtration in internal combustion engines [J]. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2021, 18(1): 8621–8636.
- [17] SALEH A, HOSSEINI S, TAFRESHI H V, et al. 3-D microscale simulation of dust-loading in thin flat-sheet filters: A comparison with 1-D macroscale simulations[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 99(3): 284–291.
- [18] LEUNG N H L. Transmissibility and transmission of respiratory viruses [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2021, 19(8): 528–545.

责任编辑:李翠薇